

Проект ТАНГРА - развитие и применение метода меченых нейтронов для изучения ядерных реакций и элементного анализа

Копач Ю.Н.
ЛНФ ОИЯИ

от имени коллаборации TANGRA

Проект TANGRA: TAgged Neutrons and Gamma-RAys

Участники:

1. *Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR, Dubna, Russia*
2. *Veksler and Baldin Laboratory of High Energy Physics, JINR, Dubna, Russia*
3. *Dzhelepov Laboratory of Nuclear Problems, JINR, Dubna, Russia*
4. *Laboratory of Radiation Biology, JINR, Dubna, Russia*
5. *Lomonosov Moscow State University, SINP, Moscow, Russia.*
6. *N.L. Dukhov All-Russian Automation Research Institute, Moscow, Russia.*
7. *Laboratory for Nuclear Analytical Methods, Institute Ruđer Bošković, Zagreb, Croatia*
8. *Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria*
9. *Banaras Hindu University, Varanasi, India*
10. *University of Alexandria, Egypt*

Цели проекта

1. Фундаментальные исследования

Использование пучков меченых нейтронов для проведения измерений в области фундаментальной ядерной физики

- Исследование реакций неупругого рассеяния нейтронов (n,n') с использованием метода меченых нейтронов.
- Исследование реакций ($n,2n'$), (n,n') с использованием метода меченых нейтронов.

2. Прикладные исследования

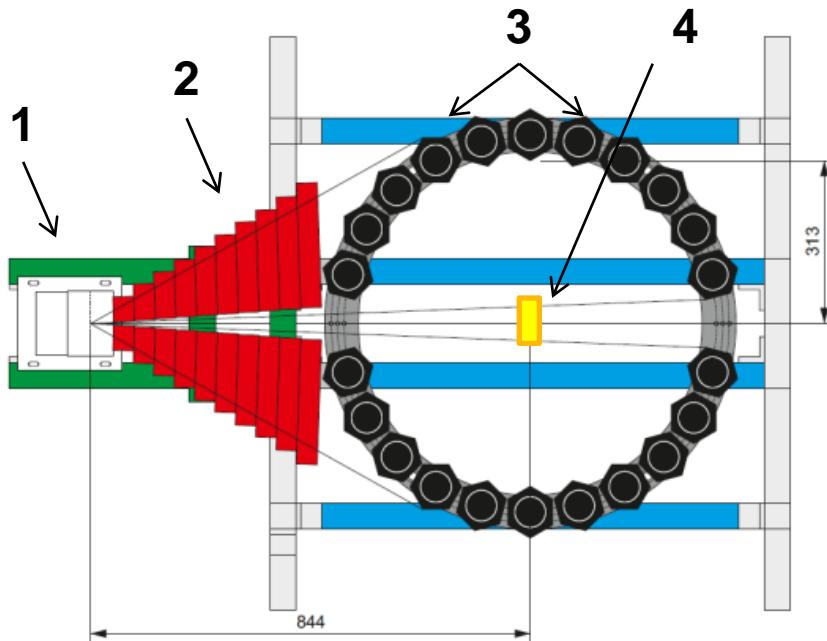
- Развитие и применение метода меченых нейтронов для неразрушающего анализа и идентификации более широкого класса элементов и веществ.
- Создание/развитие базы данных по сечениям реакций взаимодействия нейтронов с энергией 14.1 МэВ с ядрами и характеристическим гамма-линиям.
- Разработка методики по исследованию элементного состава грунтов и минералов с целью определения содержания в них различных элементов

3. Методические исследования

- Разработка алгоритмов анализа экспериментальной информации, поступающей с детекторов нейтронного и гамма-излучений.
- Создание детекторов с улучшенными временными и энергетическими характеристиками для использования в интенсивных нейтронных полях.

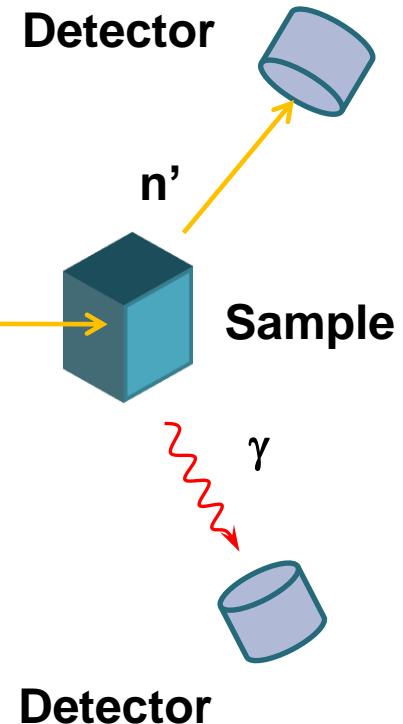
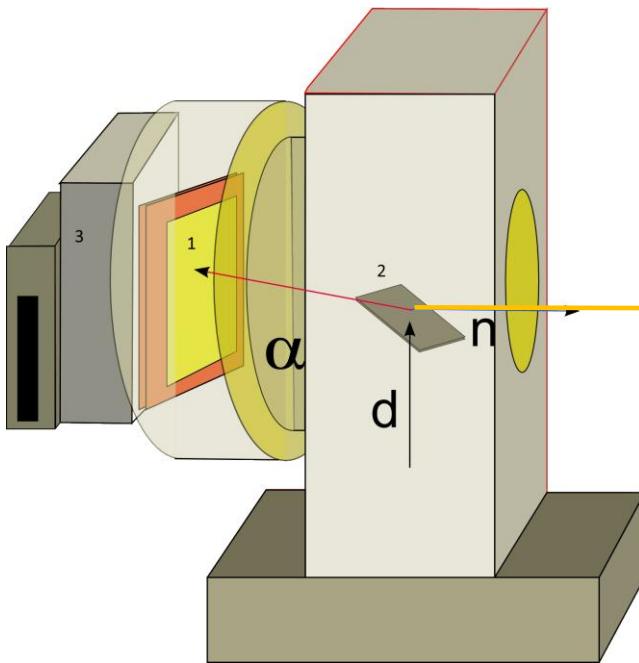


Основные компоненты установки TANGRA



1. Neutron generator with a position sensitive detector of α -particles
2. Shielding (optional)
3. Detectors of γ -rays / neutrons
4. Sample

Метод мечевых нейтронов (ММН)



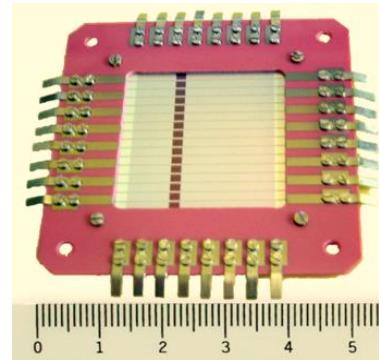
Neutron generator ING-27

Measured quantities:

- Pulse height (particle energy)
- Time-of-flight (n-gamma separation, background rejection)
- Pulse shape (n-gamma separation)
- Angle of emission of the incident neutron and secondary particle (neutron or gamma)



Нейтронный генератор ING-27



Produced by N.L. Dukhov All-Russian Automation Research Institute

Maximal intensity

$\sim 5 \times 10^7$ с⁻¹

Neutron energy

14.1 МэВ

Neutron radiation mode

steady-state

Power supply

200 ± 5 В

Maximum power consumption

40 Вт

Dimentions

130x279x227 мм

Weight

8 кг

Operation time

~1000 hours

Detector of α -particles

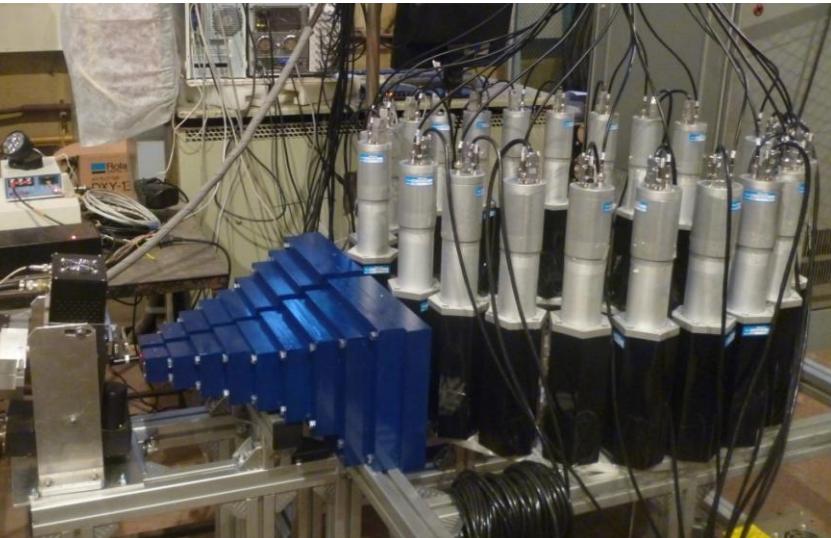
9, 64 or 256-pixel position
sensitive silicon detector

Основные преимущества ММН, используемые в проекте ТАНГРА

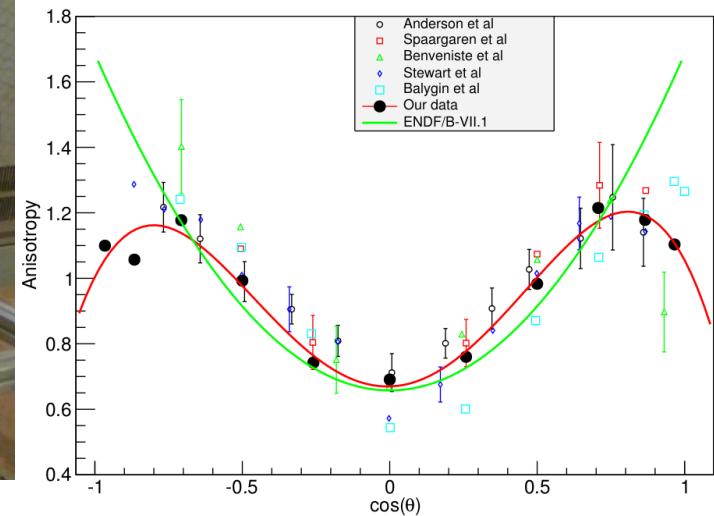
- Информация о пространственной и временной локализации взаимодействия нейтрона с образцом (X, Y – координаты задаются положением пикселей α -детектора; Z, t – координаты задаются временем пролета)
- Точное знание о количестве нейтронов, попадающих на мишень (каждый нейtron «помечается» α -детектором)
- За счет отбора событий в интересующей нас пространственно-временной области существенно уменьшается фон
- Метод позволяет идентифицировать различные элементы по их характеристическим гамма-линиям

Первые эксперименты в проекте TANGRA

Измерение угловых распределений гамма-квантов с энергией 4.43 MeV в реакции $^{12}\text{C}(\text{n},\text{n}'\gamma)$



Our fit
ENDF/B - VII



$$w \sim 1 + a \cdot \cos^2 \theta - b \cdot \cos^4 \theta$$

$$\begin{aligned} a &= 2.47 \pm 0.1 \\ b &= 2.04 \pm 0.12 \end{aligned}$$

Anderson et al.:
 $a = 1.75 \pm 0.18$
 $b = 1.20 \pm 0.31$

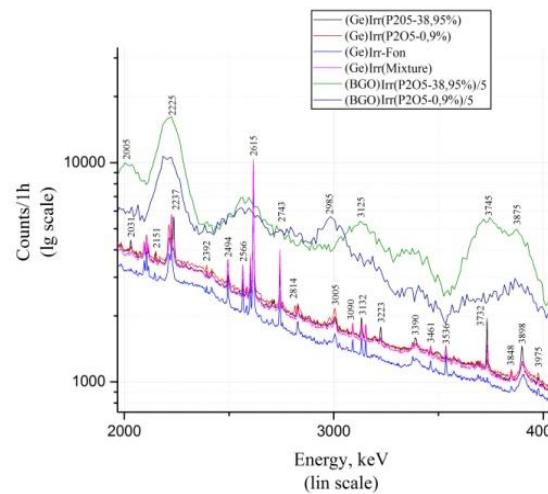
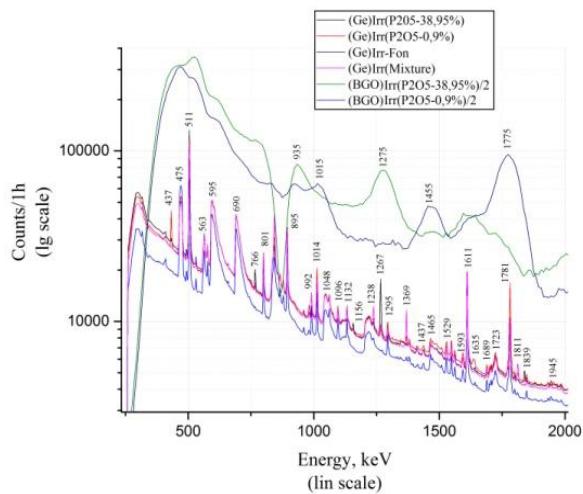
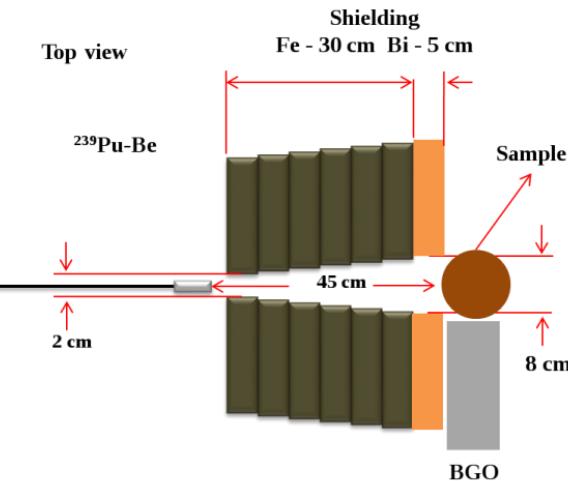
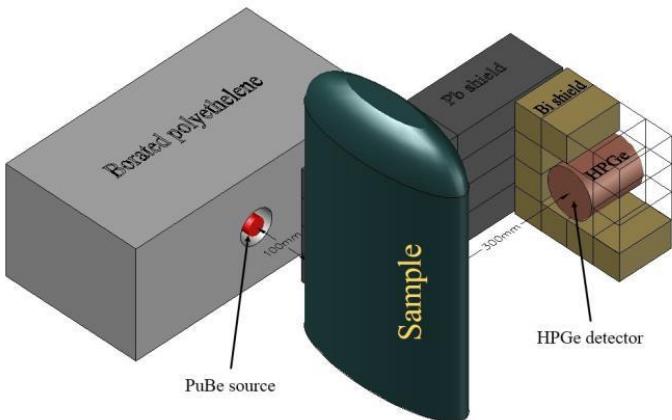
Yu.N. Kopatch et al, Reported at ISINN-23, Dubna (2015)
V. M. Bystritsky et al, Physics of Particles and Nuclei Letters (2016)



Прикладные работы в проекте TANGRA

Определение элементного состава сырой руды

Reported at ISINN24

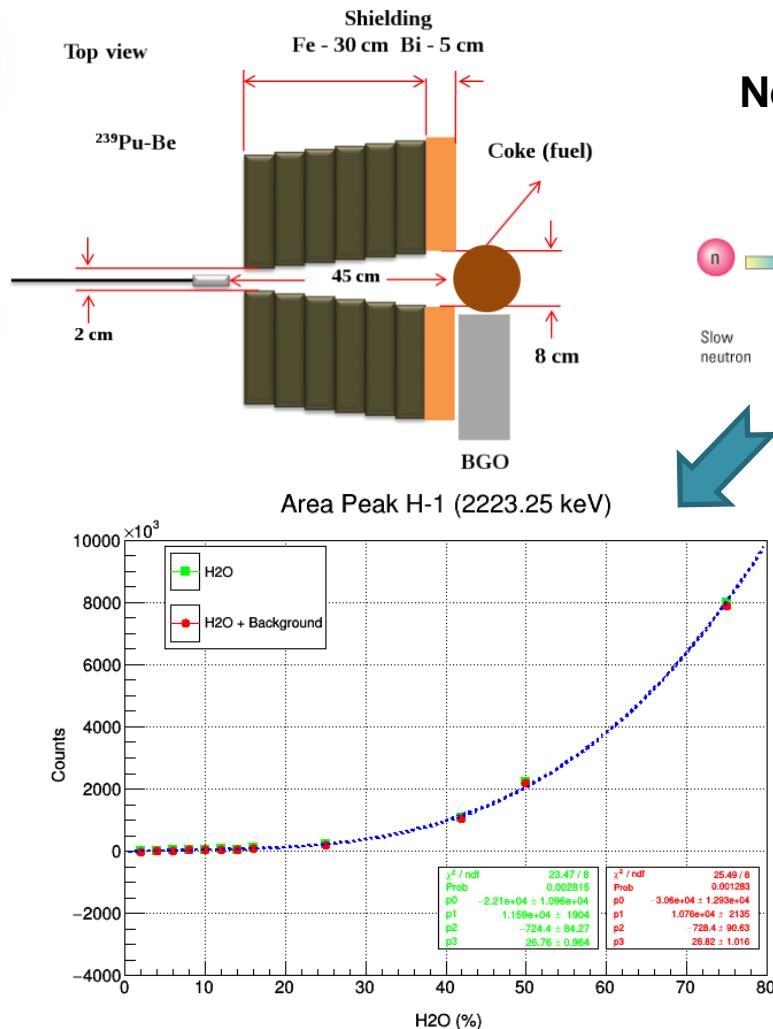


C.Hramco et al, ISINN-24 Dubna, May 24–27, 2016, JINR, E3-2017-8, p. 157

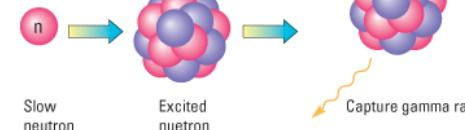
Прикладные работы в проекте TANGRA

Определение относительной влажности кокса

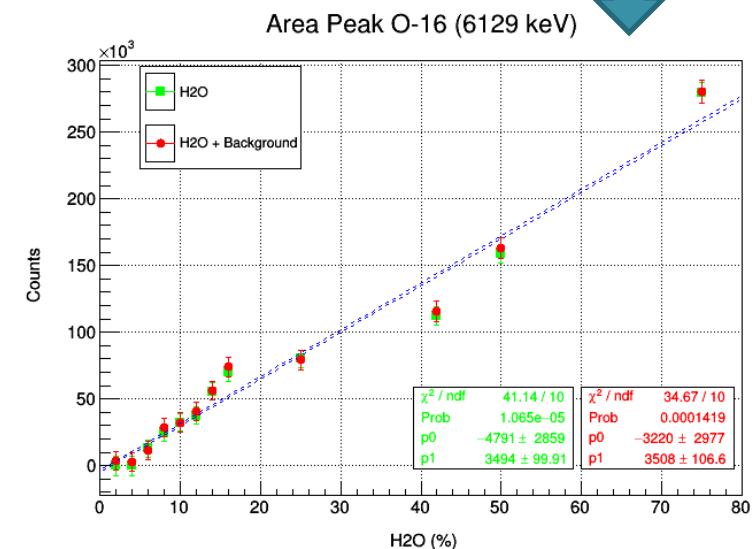
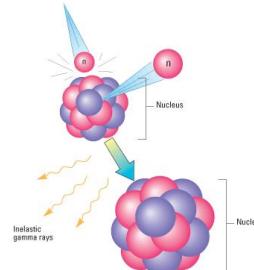
Reported at ISINN24



Neutron capture



Neutron inelastic scattering





Методические работы

Развитие цифровой электроники и систем накопления и анализа данных



ADCM-16



- 16/32/64-канальные оцифровщики в формате одной или нескольких PCI-E карт.
- Частота оцифровки 100 or 66 MHz
- Оцифрованные сигналы передаются через шину PCI-E в память компьютера; анализ данных происходит в ЦПУ компьютера.
- Максимальная загрузка системы $\sim 10^5$ событий в секунду



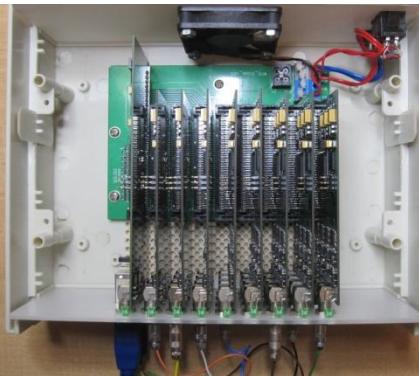
Методические работы

Развитие цифровой электроники и систем накопления и анализа данных (II)



32-канальный Цифровой Регистратор Сигналов (ЦРС-32):

1. Мини крейт
2. Одна управляющая плата
3. До 8 рабочих плат



- Рабочая плата: 4 независимых канала с частотой оцифровки 200 МГц и разрешением 11 бит.
- Может быть заменена на 2-канальную плату с частотой оцифровки 100 МГц и разрешением 16 бит.
- Передача данных – через USB-3.
- **Обработка сигналов происходит внутри ЦРС-32**
- Максимальная загрузка системы $\sim 10^5$ событий в секунду **по каждому каналу**

Методические работы

Разработка кремниевого 2-мерного позиционно-чувствительного детектора быстрых нейтронов для измерения профилей меченых пучков

2D detector, made of 4 double sided stripped position sensitive Si detectors

Each Si detector consists of 32x32 strips ~1.8 mm thick

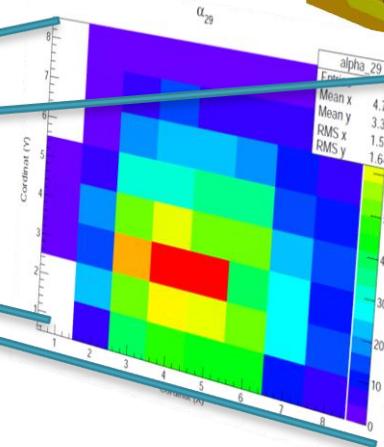
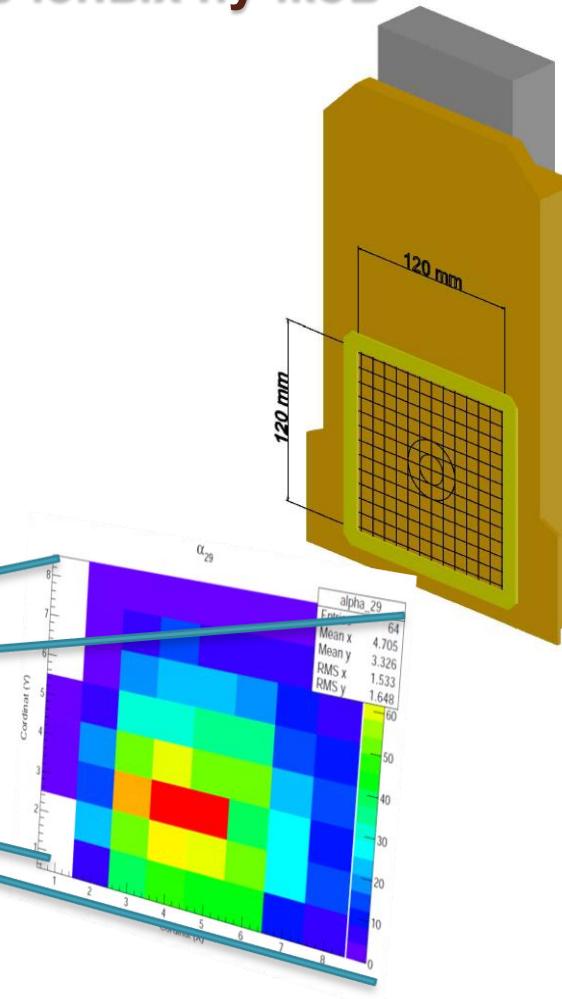
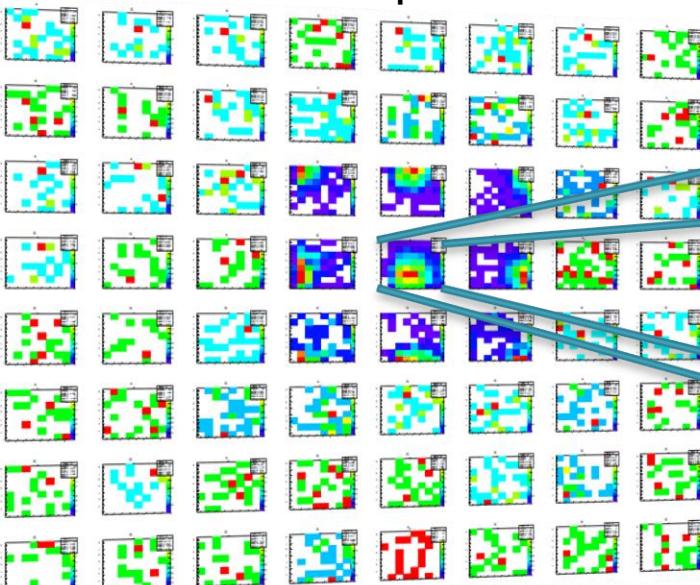
Size of one detector: 60x60mm

Total size: 120x120 mm

Thickness: 300 mkm

Neutron detection efficiency: ~0.8%

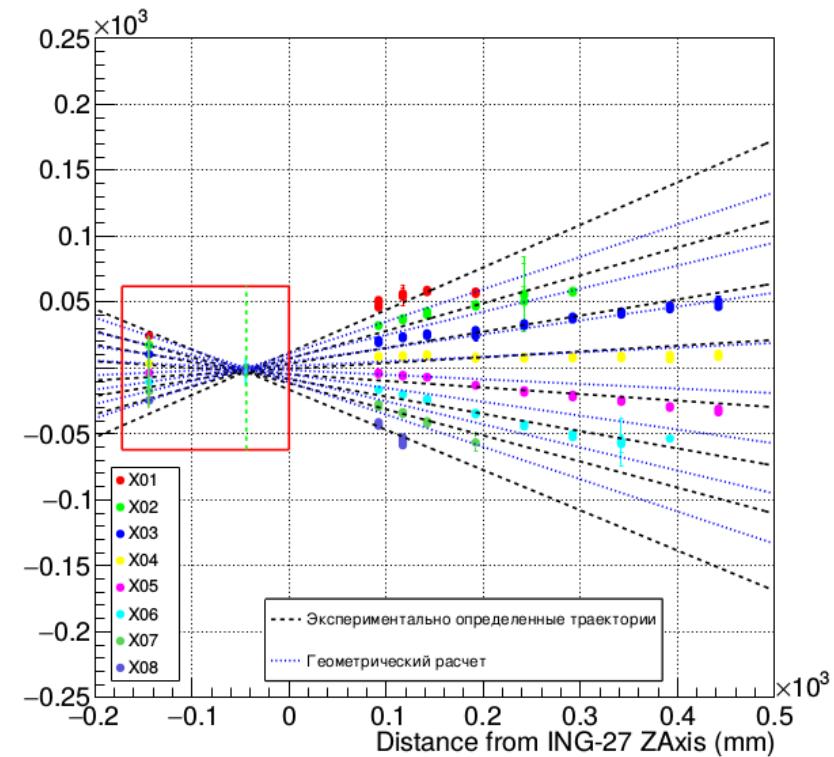
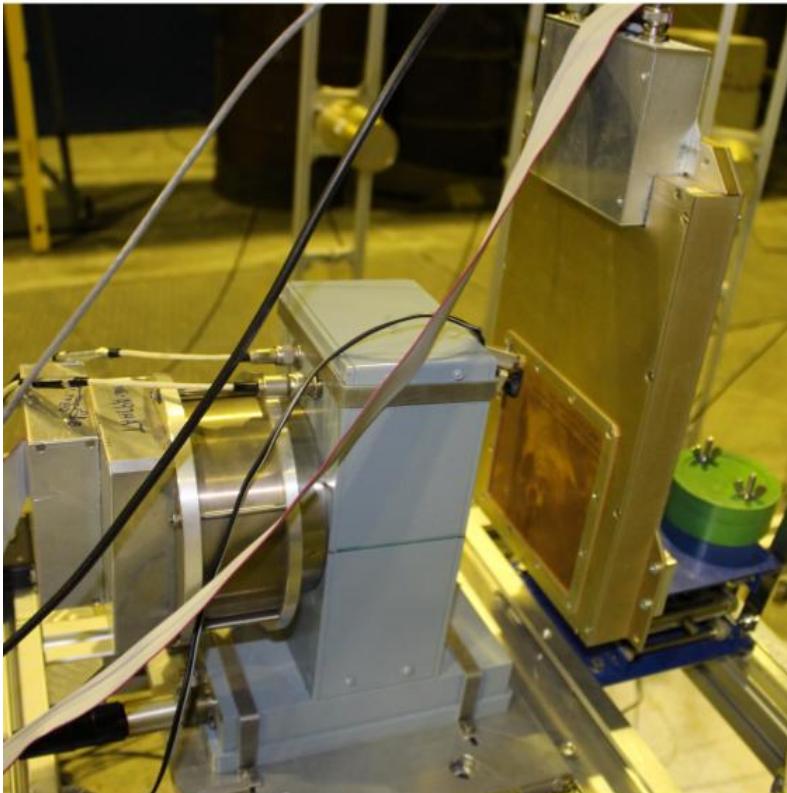
At this stage each 8 strips are grouped together forming a matrix 8x8 with a pixel size of ~1.5x1.5 cm



F.Aliev et al, I reported at SINN-25 Dubna, May 22–26 2017

Методические работы

Измерение профилей мечевых пучков



Фундаментальные исследования в проекте TANGRA

*Измерения угловых распределений и парциальных сечений
вылета гамма-квантов в неупругом рассеянии нейтронов с
энергией 14.1 MeV на различных ядрах*

Основные задачи:

- Устранение имеющихся различий между экспериментальными и оцененными данными
- Для ряда ядер/гамма переходов угловые распределения не были измерены
- Исследование возможных различий между рассеянием протонов и нейтронов на ядрах
- Развитие комплексной теории угловых корреляций в реакциях неупругого рассеяния нейтронов
- Угловая анизотропия гамма-квантов должна быть учтена при использовании метода меченых нейтронов для элементного анализа



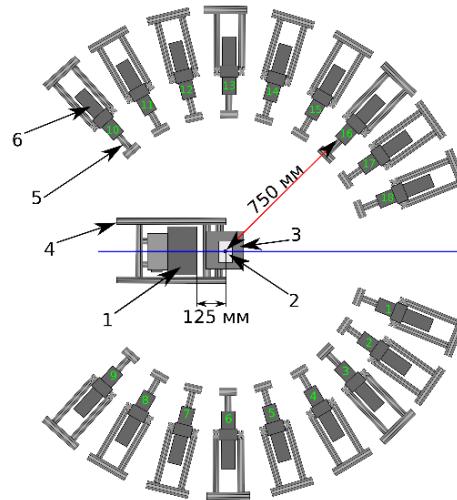
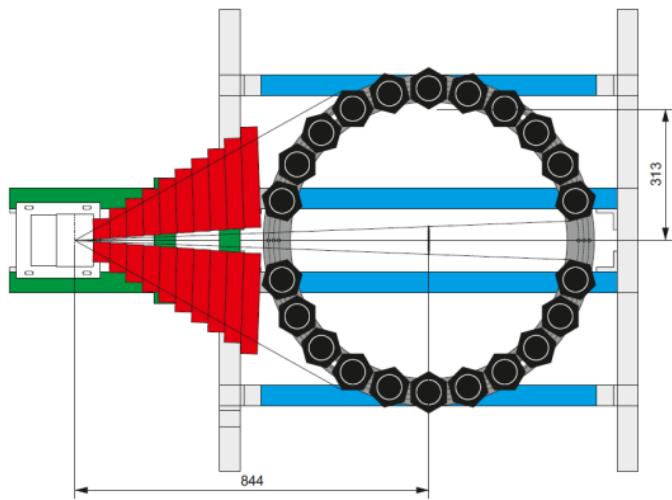
Две экспериментальные установки для измерения угловых корреляций гамма-квантов/нейтронов



Stage I: 22 NaI detectors



Stage II: 18 BGO detectors





Две экспериментальные установки для измерения угловых корреляций гамма-квантов/нейтронов



Образцы

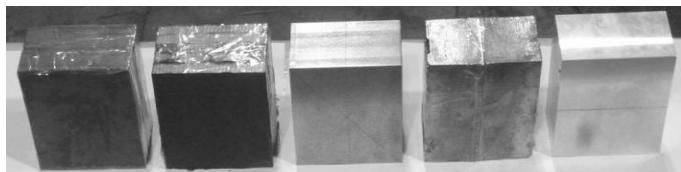
Stage I:

Pb, C, Fe, Bi, Al, SiO₂, N

Расстояние до ИНГ-27: 850 мм

Размер - 100x100x50 мм

Облучается одним меченым пучком (соответствующим одному пикселью в альфа-детекторе)



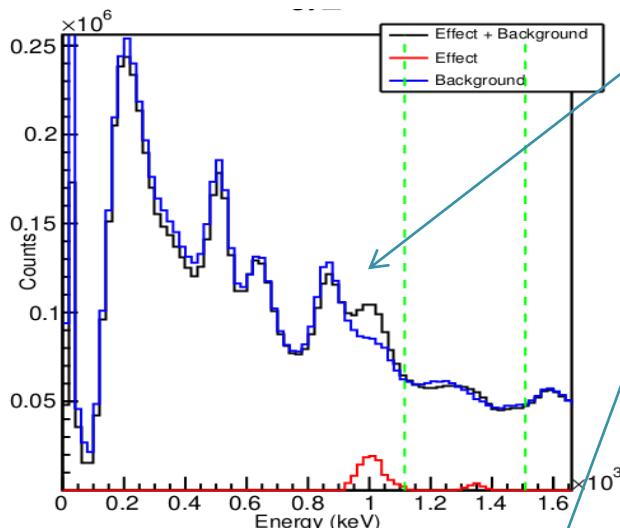
Stage II:

Ti, Mg, Ca, Zn, Ni, Sn, KCl, NaCl, MnO₂

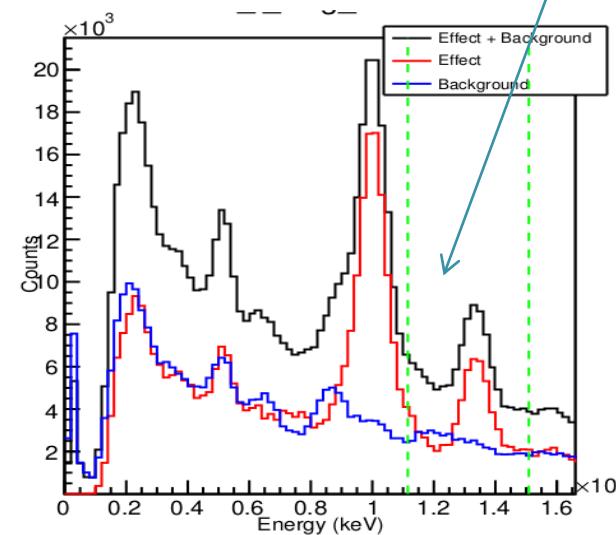
Расстояние до ИНГ-27: 125 мм

Размер – оптимизировался с помощью расчетов Monte Carlo с целью использования максимального количества меченых пучков и минимизации поправок на поглощение γ -квантов в мишени

Энергетические и времяпролетные спектры из BGO

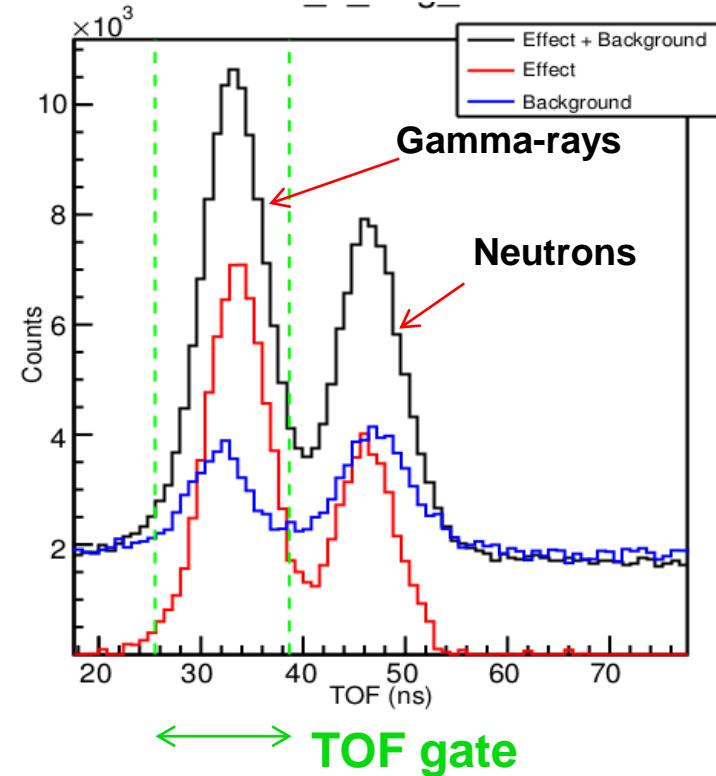


Энергетические спектры от образца (черный), фона (голубой) и эффекта (образец минус фон – красный)

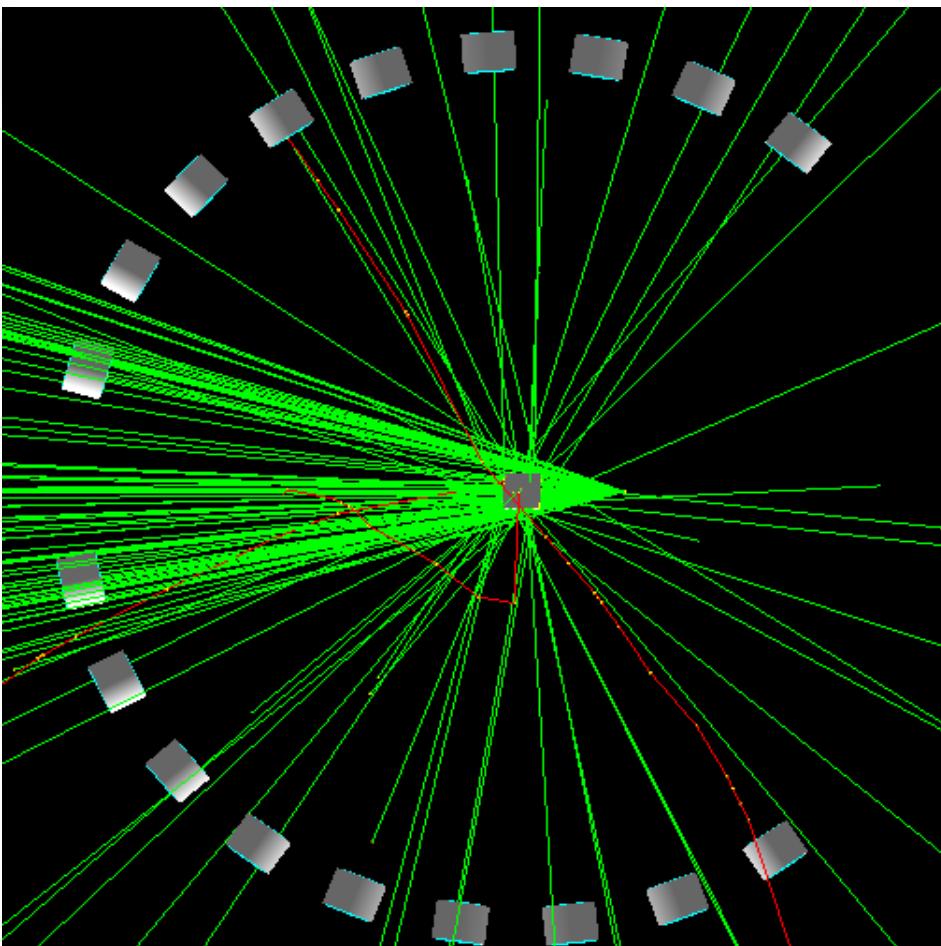


Аналогичные спектры в окне альфа-гамма совпадений

Временной спектр совпадений BGO-альфа



Расчет поправок на поглощение гамма-квантов в образце с помощью программного пакета GEANT4



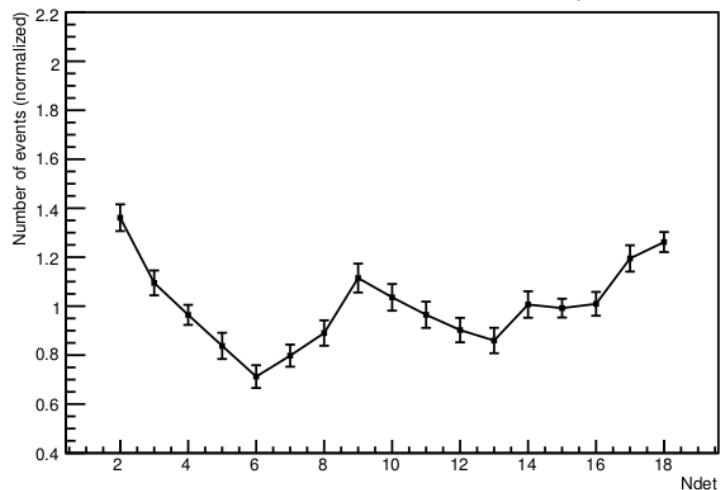
Гамма-кванты
поглощаются при
прохождении через слой
образца.

Величина коэффициента
поглощения меняется в
зависимости от
направления меченого
пучка и положения
гамма-детектора.

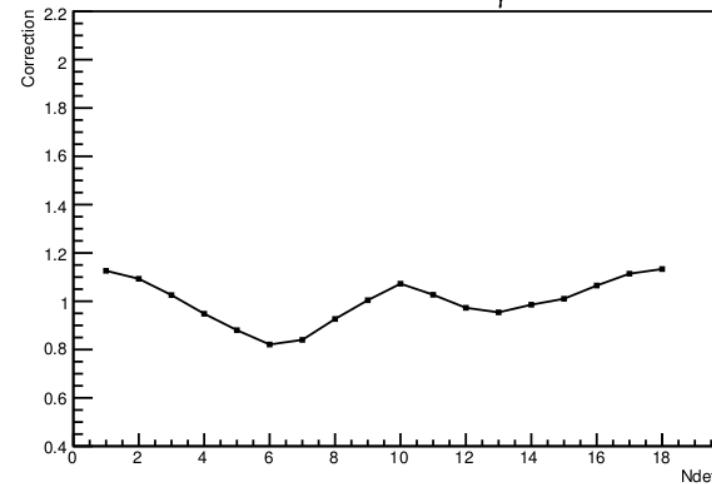
Поправки на поглощение
были рассчитаны с
помощью пакета
GEANT4.

Учет поправок в экспериментальных данных

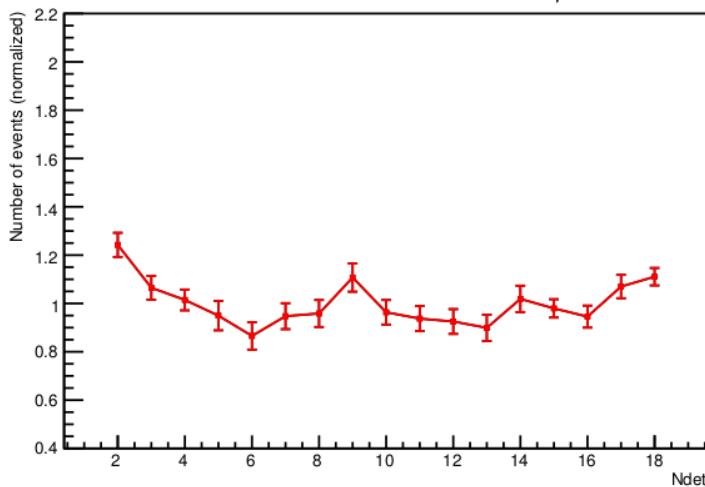
Experimental angular distribution for strip x04 $E_{\gamma} = 1775.0$



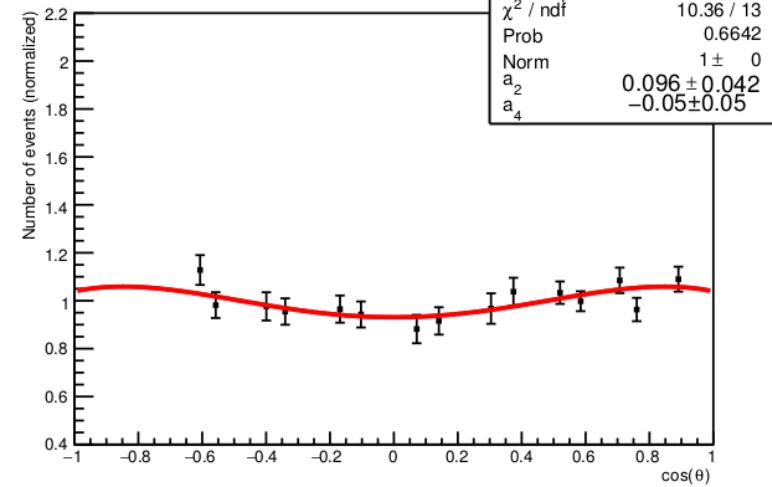
Correction for strip x04 $E_{\gamma} = 1775.0$



Corrected angular distribution for strip x04 $E_{\gamma} = 1775.0$



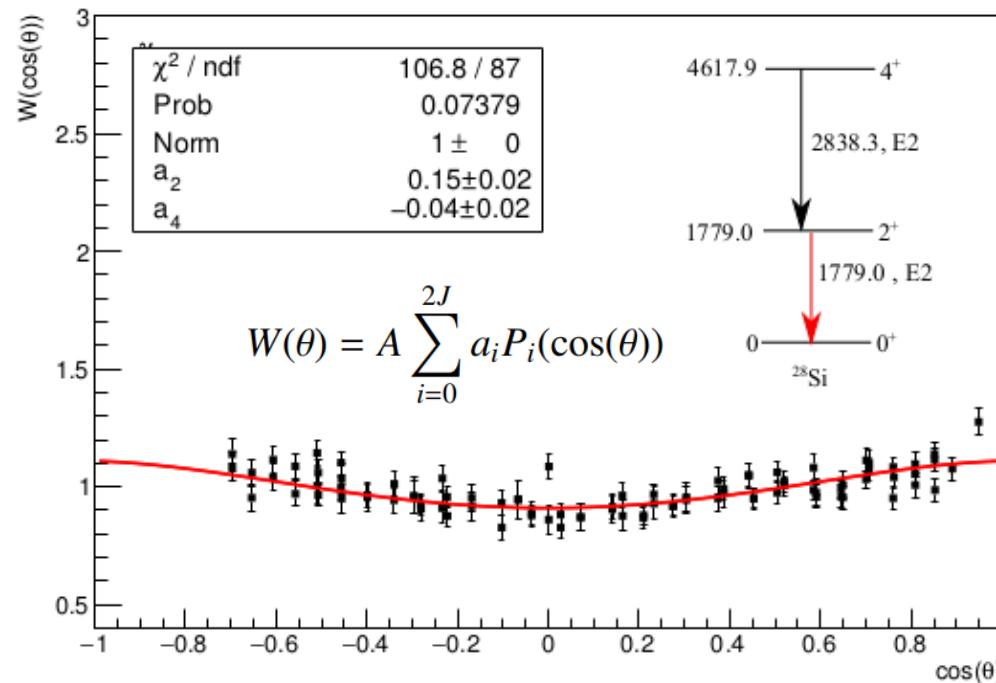
Corrected angular distribution for strip x04 $E_{\gamma} = 1775.0$





Угловые распределения для ^{28}Si

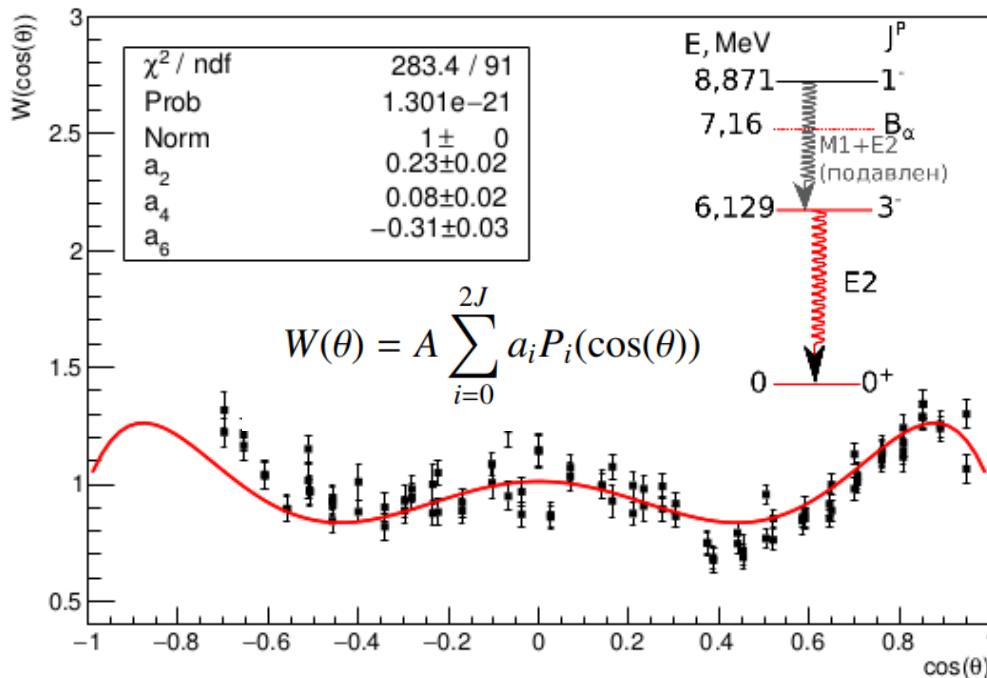
Angular distribution for $E_\gamma=1775.0 \text{ keV}$



Experiment	a_2	a_4
Abbondanno (original)	0.16	0.02
Abbondanno (our fit)	0.2 ± 0.09	0.11 ± 0.14
Zhou (original)	0.21 ± 0.02	—
Zhou (our fit)	0.17 ± 0.14	-0.05 ± 0.16
«Romashka-BGO»	0.15 ± 0.02	-0.04 ± 0.02

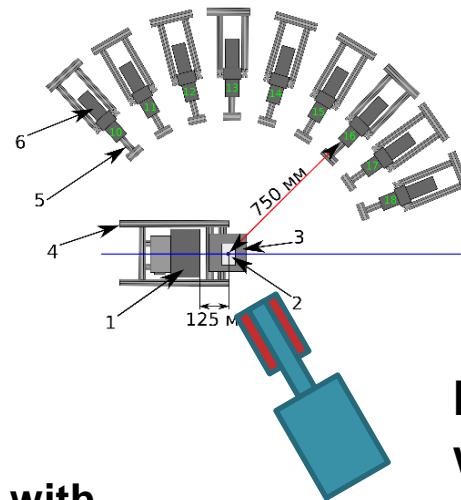
Угловые распределения для ^{16}O

Angular distribution for $E_{\gamma}=6125.0$



Experiment	α_2	α_4	α_6
Kozlowski (our fit)	0.18 ± 0.33	-0.2 ± 0.5	-0.7 ± 0.5
Morgan (our fit)	0.34 ± 0.04	0.012 ± 0.06	-0.04 ± 0.06
«Romashka-BGO»	0.23 ± 0.02	0.08 ± 0.02	-0.31 ± 0.03

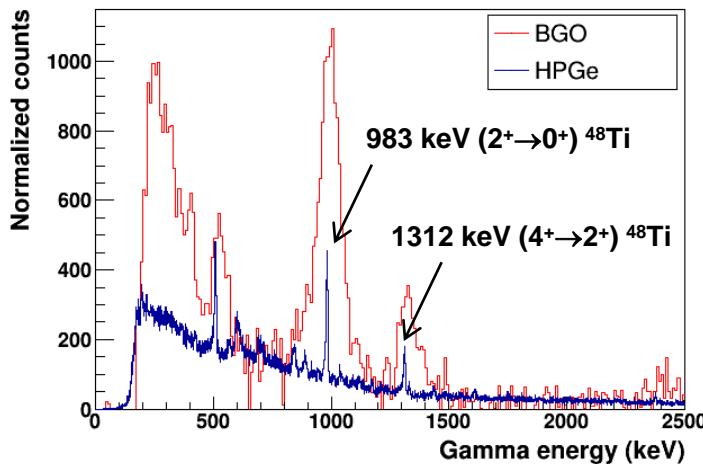
Измерение γ -квантов из неупругого рассеяния нейтронов с энергией 14.1 МэВ с помощью германиевого детектора (HPGe)



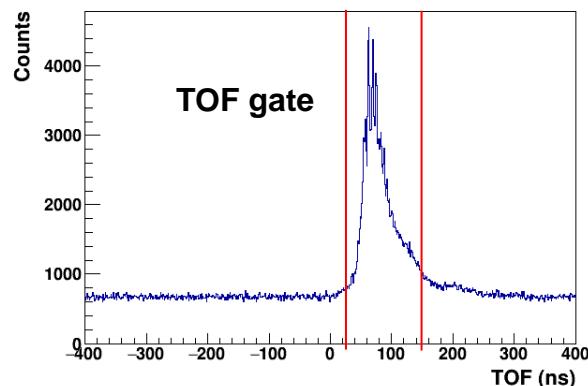
BGO detectors

HPGe detector with shielding

Energy spectra for $\text{Ti}(\text{nn}'\gamma)$ obtained with BGO and HPGe detectors using TNM



TOF spectrum from HPGe

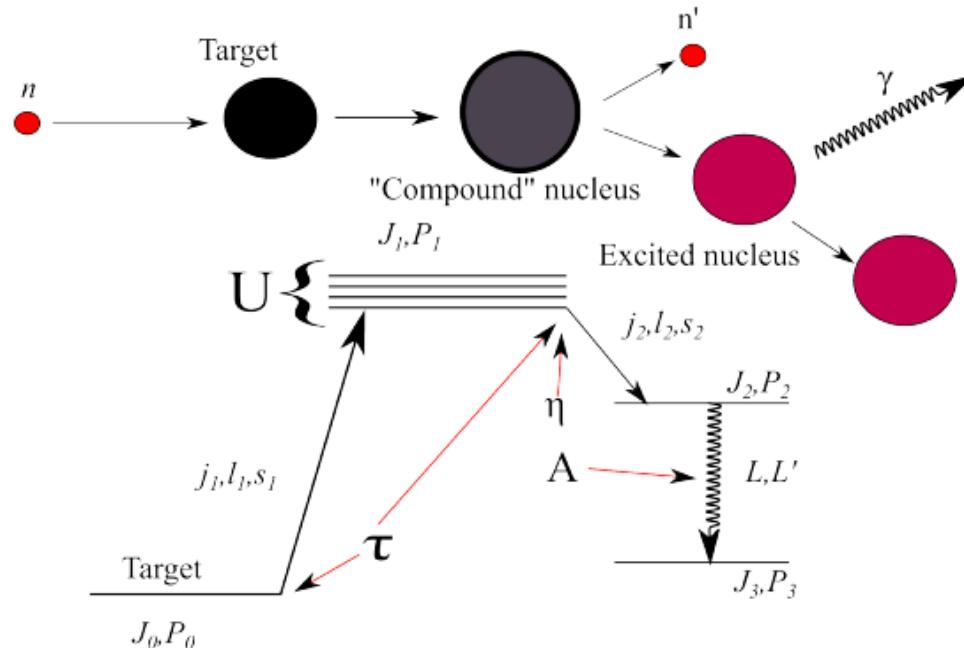




Планы на будущее

Создание теоретической модели, описывающей угловые корреляции гамма-квантов и нейтронов в неупругом рассеянии

Calculation of the angular distribution of γ -quanta in the Compound Nucleus framework



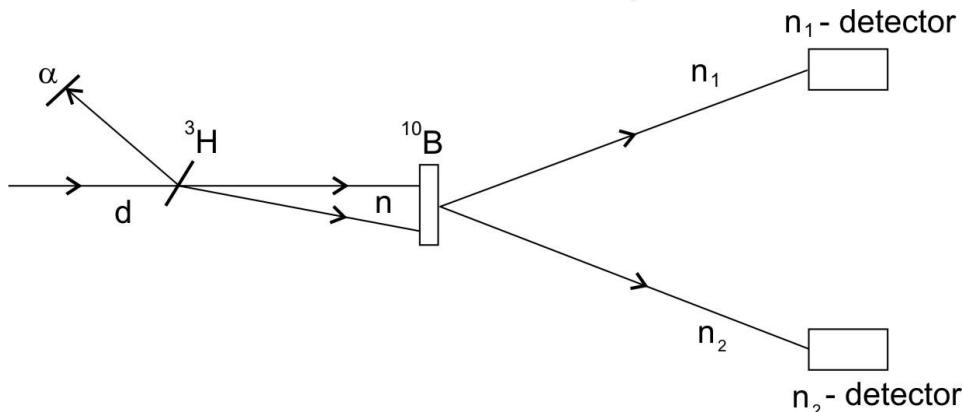
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{4} \frac{\lambda}{2\pi} \sum_{j_1, J_1, j_2, L', v} g\eta_v(j_1, j_1, J_0, J_1) \times \\ \times U_v(j_2, j_1, J_1, J_2) A_v(L, L', J_3, J_2) \tau P_v(\cos(\theta)) \quad (1)$$

- N.Fedorov, reported at ISINN-25, May 22-26 2017, Dubna
- N.Fedorov, Master Thesis, 2017



Планы на будущее

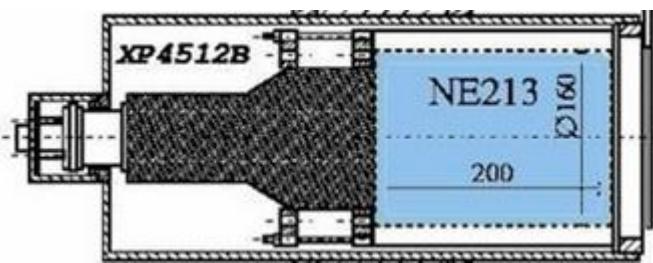
Исследование реакций $(n,2n')$ и (n,n') методом меченых нейтронов



Investigation of the reaction $^{10}\text{B}(n,2n)^9\text{B} \rightarrow \text{p} + ^8\text{Be}$.

Aim: *Obtaining information about the low-lying levels of the unstable nucleus ^9B*

Method: *Measurement of the energies of two neutrons using time of flight and calculation of missing-mass spectrum for ^9B .*



Using high efficiency DEMON detectors with n -gamma separation capability

Заключение

- Проект, нацеленный на применение ММН для экспериментальных исследований в области фундаментальной и прикладной физики, реализуется в ОИЯИ.
- В настоящее время на установке ТАНГРА ведутся эксперименты по измерению неупругого рассеяния нейтронов с энергией 14.1 МэВ на различных ядрах.

В будущем планируется:

1. Проведение измерение характеристических гамма-квантов для различных элементов. Создание базы данных по выходам и угловым распределениям.
2. Измерение сечений реакций $(n,2n)$, (n,n') на ядрах, важных с точки зрения ядерной астрофизики и ядерной энергетики.
3. Создание и развитие теоретических моделей для всестороннего описания взаимодействий быстрых нейтронов с ядрами.

Спасибо за внимание!

